# 浅埋炸药爆炸动力学研究进展

赵振宇[1,2],任建伟[1,2],金峰[3],张杜江[1,2],周贻来[1,2],卢天健[1,2]

(1. 南京航空航天大学机械结构力学与控制国家重点实验室,210016 南京;
2. 南京航空航天大学多功能轻量化材料与结构工信部重点实验室,210016 南京;
3. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室,710049 西安)



**摘 要:**浅埋炸药爆炸是现代装甲车辆及其乘员的主要威胁。分析和探究浅埋炸药爆炸的作用机理及其影响因素是提升装甲车辆地雷生存能力、保障乘员安全的前提条件和重要基础。综述了目前国内外学者在浅埋炸药爆炸动力学方面的最新研究成果。首先介绍了浅埋爆炸动力学的研究方法,进而梳理了浅埋爆炸毁伤机理及其载荷传递规律。最后,针对本领域中相关研究工作给出了几点建议。

**关键词:**浅埋炸药;爆炸载荷;结构毁伤;毁伤机理

**中图分类号:**O389　　　　**文献标志码:**A

# Progress in research on explosion dynamics of shallow-buried explosives

ZHAO Zhenyu[1,2], REN Jianwei[1,2], JIN Feng[3], ZHANG Dujiang[1,2], ZHOU Yilai[1,2], LU Tianjian[1,2]

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 210016 Nanjing, China; 2. MIIT Key Laboratory of Multifunctional Lightweight Materials and Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 210016 Nanjing, China;
3. State Key Laboratory for Mechanical Structure Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, 710049 Xi'an, China)

**Abstract:** Blast loading induced by shallow-buried explosives is the main threat to an armored vehicle and its occupants. Studying and investigating the underlying mechanism and its influential factors is the prerequisite and basis for improving the survivability of armored vehicles and ensure the safety of occupants. We present a critical overview on the destruction mechanisms of shallow buried explosives and the corresponding measurement methodologies and characterization. First, various research methodologies for blast dynamics are introduced, and factors affecting blast load transmission are summarized and discussed. Then, experimental and simulation methodologies concerning shallow-buried explosive blast loading are summarized. Finally, future research directions concerning protection against shallow-buried explosives are highlighted.

**Key words:** shallow-buried explosive; blast loading; structural destruction; destructive mechanism

---

**收稿日期:**2021-05-31　　　　**修回日期:**2021-12-08
**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 11972185;12002156;12072250);中国博士后科学基金资助项目(No. 2020M671473)
**通信作者:**卢天健,教授。E-mail: tjlu@nuaa.edu.cn
**引用格式:**赵振宇,任建伟,金峰,等. 浅埋炸药爆炸动力学研究进展[J]. 应用力学学报,2022,39(1):1-11.
ZHAO Zhenyu, REN Jianwei, JIN Feng, et al. Progress in research on explosion dynamics of shallow-buried explosives[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(1): 1-11.

随着局部区域武装事件的不断升级,军用车辆及民用车辆所面临的安全威胁日益增大。对于军事冲突区域的军用及民用车辆而言,浅埋炸药(shallow-buried explosive,SBE)及简易爆炸装置(improvised explosive devices,IED)是造成人员伤亡及车体损害的主要威胁[1-2]。浅埋炸药爆炸期间,瞬时高强载荷不仅使车体发生倾覆变形[5],甚至造成内部乘员组织损伤及肢体残缺[2],如图 1 所示。因此,提高车体的抗爆性能是提升乘员在战场环境中的生存几率及车辆设备的使用效率的主要措施。为提高战争环境下车体的使用寿命,满足各国现役装备的防护需求,国内外学者对浅埋炸药爆炸动力学的爆轰毁伤机理及其影响因素开展了科学研究。

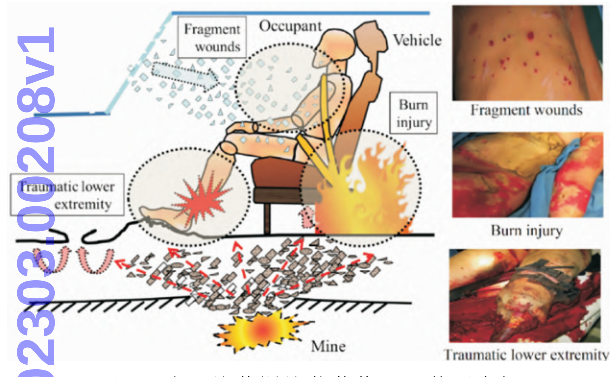



图 1　浅埋炸药爆炸载荷作用下装甲车辆及乘员毁伤示意图[2,5]

Fig. 1　Sketch of damage to armored vehicle and injury of occupant from blast loading induced by shallow-buried mine[2,5]

由于浅埋砂土颗粒的覆盖作用,浅埋炸药爆炸产生的载荷形式及破坏能力相较于普通的爆炸冲击波有较大差异[6-7]。为了有效降低浅埋炸药对车体的损害及对乘员的伤害,有必要深入理解浅埋炸药爆炸载荷的演化过程及作用机理。为了揭示砂土颗粒在浅埋炸药爆轰下的加载过程和加载特征,现阶段普遍采用的试验方法有直接法和间接法,前者为浅埋爆炸装置的等尺或缩尺爆炸试验[8-11],后者为砂团(sand slug)的高速撞击试验[12-15],本文主要介绍直接法的研究现状。由于爆炸引起的爆轰载荷在极短时间内完成(通常为 ms 级),针对该类特殊工况的现象捕捉和特征描述存在较高的技术门槛。与此同时,作为一种新兴的数值仿真技术,光滑粒子流体力学(SPH)和离散元(DEM)方法已被广泛应用于浅埋炸药爆炸载荷的过程演化及作用机理等方面的研究[16-19]。

本文对于浅埋炸药爆炸动力学有关的国内外研究进展及现状进行归纳,其主要内容分为 3 部分:第一部分介绍浅埋炸药爆炸问题的研究方法,包括实验方法和数值仿真方法;第二部分论述浅埋炸药爆炸载荷的影响因素及其载荷冲量的量化表征;最后,提出该领域面临的若干问题,同时给出相关建议。

## 1　浅埋炸药爆炸动力学研究方法

现实战场中,爆炸载荷往往伴随着较大的结构破坏和人员伤害。按照爆炸波的传播介质,爆炸载荷可归纳为:空气爆炸、水下爆炸和岩石爆炸等几种形式[20]。其中,在岩石爆炸中,根据地雷或炸药等爆炸物的布设位置和炸坑形貌[21],又可细分为:地表爆炸、浅埋爆炸、深埋爆炸和地下爆炸等(见图 2)。现阶段,对战时装备及人员的最大威胁是浅埋炸药爆轰加载。

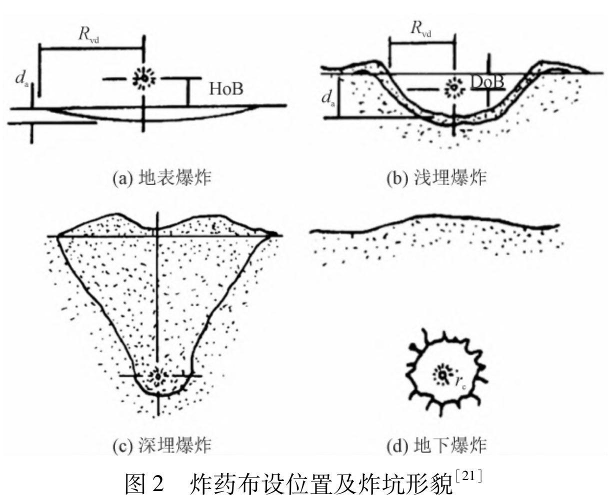
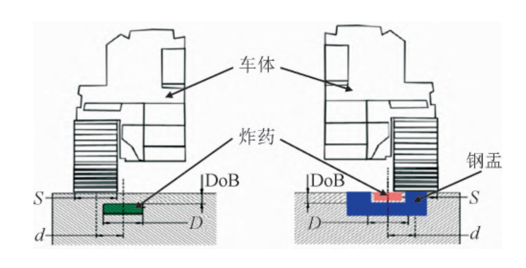



图 2　炸药布设位置及炸坑形貌[21]

Fig. 2　Mine location and crater configuration[21]

根据装甲车辆地雷防护评价规程,可将地雷爆轰加载方式分为两种类型,即浅埋地雷替代物爆炸和钢盂内置炸药爆炸加载[22]。图 3 所示为浅埋炸药爆轰载荷试验装置及其等效加载方法的试验装置。浅埋地雷替代物爆炸是在靶板下方的相应位置处布设规定埋深(depth of burial,DoB)的爆炸物,然后在爆炸物上方覆盖砂石料,见图 3(a),通过爆炸物所产生的冲击波及高速砂土抛射完成加载过程。钢盂式炸药爆炸,是将内含爆炸物的钢制容器放置于相应位置,使容器上表面裸露于地表,利用钢盂对炸药冲击波的约束作用,增强炸药对结构物的冲击效果,如图 3(b)所示。浅埋地雷替代物爆炸加载方式是目前较为常见的试验手段。除少数车辆的爆炸毁伤试验外[23],鲜有针对钢盂式炸药爆轰加载方法的报道。在本文中,若无特殊说明,爆轰载荷的加载

方式默认为浅埋炸药爆轰加载。经总结,目前研究浅埋炸药爆炸动力学的方法主要集中在实验和数值仿真两种方法上。




(a)浅埋炸药式加载　　(b)钢盂内置炸药爆炸加载

图 3　爆轰载荷的加载方式[22]

Fig. 3　Methods of blast loading[22]

### 1.1　爆轰毁伤实验研究方法

目前,浅埋爆炸实验研究的主要目的分为 2 种:①测定不同工况下爆轰载荷的破坏性;②验证防护结构的安全性。就前者而言,评价浅埋炸药爆炸毁伤能力的主要指标是爆轰冲量,因此对爆轰冲量的参数化表征始终是国内外学者关注的焦点。

针对爆轰冲量定量化评价的主要手段有 2 种,一是测量靶板在爆轰载荷加载过程中所获得的速度,通过 $I_o = mv$ 表征;二是测定爆轰产物及砂粒抛掷后与靶体高速碰撞而产生的接触力随时间的变化曲线,由 $I_o = \int_0^T F(t)\,\mathrm{d}t$ 表征。基于此,按照其工作机理,可将爆轰载荷冲量的测定装置分为两类:靶板自由式[24]和靶板固定式[22-23,25-27]。靶板自由式通常依靠高速摄影技术,捕捉并计算靶板及配重在砂爆加载过程中的抬升速度,以 $I_o = mv$ 进行表征;与此方法不同,靶板固定式是将靶板固定在试验平台上,通过在相应位置布设的压力传感器提取爆轰载荷对压力传感器的压力时程变化,然后计算 $I_o = \int_0^T F(t)\,\mathrm{d}t$,以获取爆轰载荷冲量。与此同时,就砂爆载荷的加载机理而言,为使砂团获得冲量,有学者通过高压气体[28]或高速活塞撞击[14-15,21]等方式赋予砂粒动能,以此模拟浅埋炸药爆轰过程中砂粒与靶板的高速撞击过程。为准确捕捉爆轰砂爆产生的加载冲量,也有学者利用 X 射线扫描设备,直接对砂料抛掷产物进行实时扫描,通过计算砂料的速度推算砂爆冲量[29]。需要指出的是,相较于其他测量方法,该方法避免了靶体及探测设备等因素引起的试验误差,具有较高的可重复性。

Grujicic 等[30]组装了一套竖向冲量测量装置,如图 4(a)所示:在靶板上方放置固定的动量捕捉检测装置,通过垂直导轨连接检测装置和靶板(1.524 m × 0.101 m 钢板)。浅埋炸药爆炸时,爆轰载荷加载到靶板上,靶板产生垂直向上的位移,该位移被检测装置捕捉,进而由该位移反推出本次砂爆载荷产生的冲量。

McShane 等[31]开发了一种适合实验室研究的浅埋炸药爆轰载荷等效模拟装置,如图 4(b)所示。该装置利用高压气体作为动力,使砂层产生爆轰载荷。为测定该装置产生的爆轰冲量,该团队介绍了一种小型砂爆冲量的测定装置。通过相关试验结果对比可知,该模拟及测定装置均满足试验需求,为浅埋炸药爆轰载荷的毁伤研究及结构防护提供了新的研究手段。

同样地,Vivek 等[28]介绍了一种砂爆载荷冲量的小型测量装置,通过在预埋管中释放高压气体推动浅埋砂层抛掷,在高速砂粒撞击下推动活塞向上运动,利用高速摄影记录活塞的运动历程,并以此计算出活塞的运动速度及其相应冲量,见图 4(c)。作为砂爆载荷的等效加载测量装置,该装置的优点在于用高压气体代替爆炸物,安全性较高。但是,该装置中的活塞直径仅为 50 mm,对砂爆试验的规格要求较高,故其普遍性较为欠缺。徐小辉等介绍了一种基于气压差的大当量砂爆载荷缩比模拟试验装置[32]:将砂料依照一定规则密闭于真空容器内,在砂料中埋入含压缩气体的球壳;当球壳刺破后,高压气体释放,在气压差的作用下,砂料在真空容器中高速飞散并与靶板碰撞,从而实现爆轰载荷的等效加载过程。

作为冲击动力学的常见测量设备,Hopkinson 压杆(又称 Kolsky 杆)被广泛应用于测定固体材料在冲压载荷下的力学行为。Clarke 和 Rigby 等将 Hopkinson 压杆阵列排布,分别测定各杆在爆轰载荷下的应力变化[22-23,25-27,33],各杆之间按照插值法进行计算,由此获得爆轰载荷在靶板表面上的空间及时间分布规律,见图 4(d)。Rigby 等[25-26]开展了爆距分别为 105 mm 和 140 mm 的浅埋炸药砂爆试验,检验了该试验装置的适用性,进一步通过提取各压杆上应力的时程变化及其在空间上的分布,阐述了浅埋炸药爆炸所引发的爆轰载荷的产生过程和加载机理。

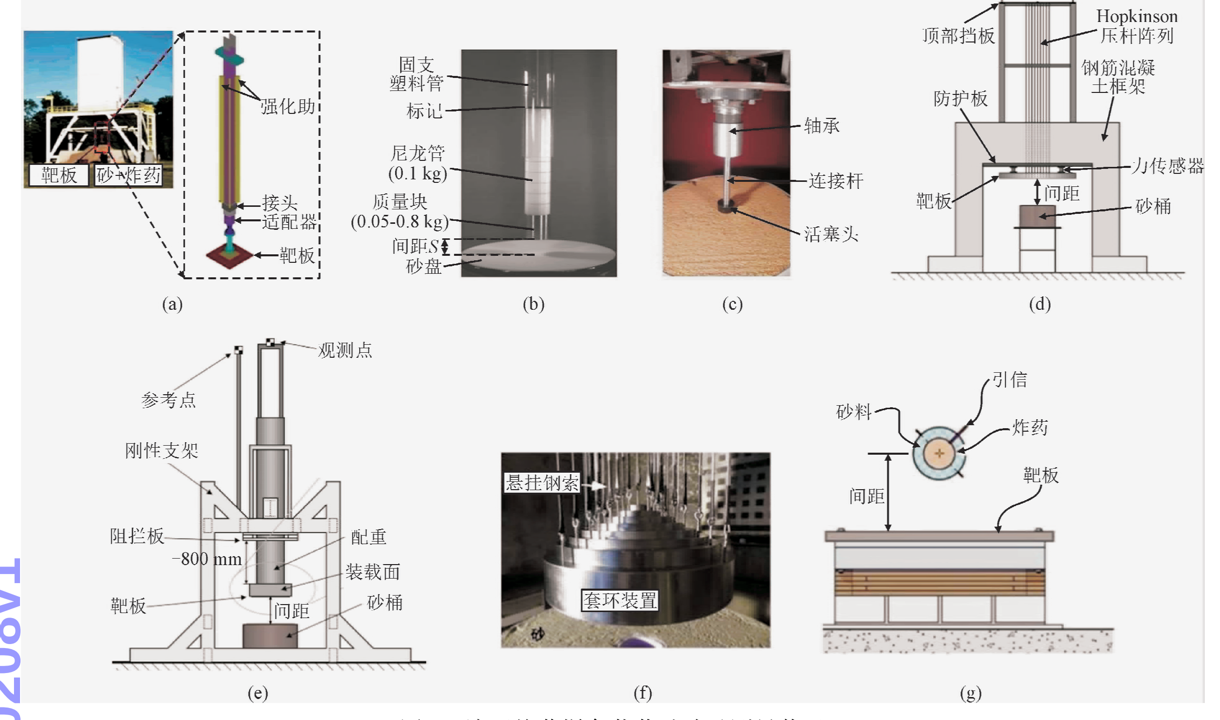



图 4 浅埋炸药爆轰载荷试验及测量装置

Fig. 4 Experimental and measuring setups of blast loading induced by shallow-buried explosives

Clarke 等[24] 通过对测定装置中靶板后方配重的最大抬升高度进行等效计算，进而对浅埋炸药爆轰载荷的冲量进行评定，见图 4(e)。该类试验装置具有使用方便、数据处理成本小等优点，但其测定的冲量为靶板整体的总冲量，不能反映冲量在靶板上的空间分布。

Denefeld 等[34] 介绍了一种测量爆轰载荷冲量空间分布的新型装置，即多环套嵌装置，如图 4(f) 所示。通过测量某时刻各圆环的上升位移计算该圆环的上升速度，进而求得该圆环区域上分布的冲量。为检验该装置的适用性，Denefeld 等[34] 进行了相关砂爆试验，分别测定了砂土种类、炸药埋深及含水量等不同参数下砂爆载荷的冲量分布，并将测定结果与数值仿真对比，二者吻合较好。该装置既可反映整体区域所受空间的精确值，又可绘制冲量在整体区域的空间分布，可对浅埋炸药爆轰载荷的定量表征和机理分析提供硬件支撑。

此外，在悬空的砂球内填充炸药，通过爆炸冲击波赋予外层砂料动能也可实现砂料对靶板的爆轰加载[35-36]，为浅埋炸药爆轰加载的研究提供了新的研究手段。Erdik、Kyner 和 Borvik 等[23,36-37] 采用悬空式球形砂爆加载方式，研究了蜂窝夹芯板和实心板的抗爆性能，如图 4(g) 所示。在该装置中，炸药被规定质量的砂石料包裹于球形易碎容器内，在球形容器下方和侧方分别布设靶板和压力脉冲传感器(通常为 Kolsky 压杆)。球形容器内的炸药被引爆后，高温高压气体推动砂料产生高速爆轰产物，该产物与靶板产生高速碰撞，实现砂爆载荷的爆轰加载。同时，预先布设的脉冲传感器记录爆轰所产生的应力波，可对其进行后续处理。通过高速摄影捕捉球状砂料的轮廓发现，该装置可产生高达 1 200 m/s 的高速喷射产物，符合砂爆载荷的加载工况。

## 1.2 爆轰载荷数值模拟

由于爆炸试验消耗巨大，数值仿真逐渐成为浅埋炸药爆轰加载的机理性分析和对比验证的主要研究手段[16-19]。目前，针对浅埋炸药爆轰载荷的模拟算法包括但不限于以下几种：ALE (arbitrary lagrange-euler)、SPH (smoothed particle hydrodynamics)、混合 ALE-SPH、FEM-SPH 和 DEM(discrete element method)等。在上述算法中，ALE 算法所获得仿真结果相对准确。虽然 SPH 算法的计算结果与试验结果较为接近，但该算法的计算成本相对较高，对大尺度复杂工况下砂爆过程的计算效率很低。同时，根据计算结果看，SPH 算法弱化了浅埋炸药爆轰载荷[16]。与此对应，由于算法兼容性及本构参数的设置等原因，ALE-SPH 和 DEM 这两种算法的计算精度和稳定性对数值模型网格精细程度和材料参数

准确性要求较高[16]。在仿真软件方面,除通用的显式动力学分析软件,如 AUTODYN、LS-DYNA,IMPETUS Afea 求解器逐渐被用于分析浅埋炸药爆轰加载的载荷机理和结构响应。近 20 年来有关浅埋炸药爆轰载荷的数值仿真及其主要内容如下。

表 1 浅埋炸药爆轰加载数值仿真汇总

Tab. 1 Typical numerical simulations of blast loading from shallow-buried explosives

| 参考文献 | 应用软件 | 主要内容 |
|---|---|---|
| 文献[6-8,38-41] | AUTODYN | ●分析了砂土含水量、埋深对浅埋炸药爆轰载荷的能量传递及炸坑形貌的影响[6-7]。<br>●提出包含固-液-气三相混合物爆炸冲击波传播模型,利用数值仿真验证该理论的适用性[38]。<br>●采用三维流固耦合算法和二维自适应算法模拟爆炸容器的内部超压载荷和砂腔尺寸,并分析了不同药量爆炸下的消能方式[39]。<br>●考虑砂粒中液相和气相的影响,通过材料模型分析含水量对砂爆过程中腔体形貌的影响[40]。<br>●借助耦合的欧拉/拉格朗日算法模拟了砂爆过程中爆轰产物的大变形问题,分别尝试了二维和三维环境下砂爆过程中砂料的膨胀扩张过程[41]。 |
| 文献[10,42-45] | LS-DYNA | ●建立内凹 V 形靶板和外凸 V 形靶板,分析靶板构型及浅埋炸药水平布设位置对爆轰冲量的影响[10]。<br>●结合有限元法(FEM)和光滑质点流体动力学(SPH)法联合数值方法,通过捕捉 SPH 粒子的飞溅过程,以此反映浅埋炸药在爆炸过程中的掀抛过程和成坑过程[42]。<br>●对比了不同砂土本构模型,即 FHWA 土壤算法和 CONWEP 经典算法在不同网格质量下的计算结果。计算结果显示:CONWEP 算法弱化爆炸载荷,使得计算结果弱于试验结果[43]。<br>●针对浅埋炸药爆炸工况,分别用 IIM 算法和 MM-ALE 算法进行对比计算,分析这两种算法在准确性和计算效率上的优劣。同时,在这两种算法基础上,提出了 IIM/MM-AIE 联合算法的仿真模拟方法,经验证该联合仿真方法具有较好的仿真性能[44]。<br>●基于 ALE 算法,建立浅埋地雷的爆轰加载模型,分析埋设深度、含水量对载荷冲量的空间分布和时程变化规律的影响[45]。 |
| 文献[22,37] | IMPETUS Afea | ●利用离散粒子流算法,建立平形靶板和 V 形靶板的砂爆加载工况,分析碰撞倾斜角度对冲量传递效率的影响[22]。<br>●利用离散元法,建立内含炸药的刚性砂粒群模型,模拟爆轰载荷下固支靶板的力学响应,并与相应的试验结果相对比,以此验证该数值方法的适用性[37]。 |

## 2 浅埋炸药爆炸毁伤机理及冲量预测

由于砂土的覆盖,浅埋炸药爆轰载荷相较于空气爆炸载荷更为复杂。在炸药的爆轰脉冲下,装药上侧覆盖层砂土的喷射及成坑过程可概括为 3 个阶段[40,46-47],即:冲击波挤压、砂土隆起、喷射与成坑,如图 5 所示,第一阶段:炸药起爆后,炸药化学能在极短时间能转变为热能和动能。此时,爆炸所产生的冲击波在砂土内部以炸药为中心向四周扩散,如图 5(a)、图 5(b)。第二阶段:当爆炸冲击波扩散至地表时,由于砂料和空气阻抗差异,使得砂料在冲压波及其反射波联合作用产生穹隆和膨胀现象,如图 5(c)~图 5(d)所示。通常情况下,覆盖层砂料隆起过程持续几毫秒。覆盖层隆起过程最终以砂料的半球形膨胀破裂结束。隆起砂丘的形貌特征与诸多因素有关,如浅埋深度、砂粒形貌及含水率等。第三阶段:随着砂粒的进一步隆起,砂粒在高压气体的推动下以较高速度膨胀扩散并脱离地表,向四周喷射形成锥形喷射物。飞溅砂粒回落后,在炸药浅埋处形成特定相貌的炸坑。影响浅埋炸药爆轰载荷的主要因素可归纳为 4 类:炸药及装药结构参数、地质条件、炸药/靶板布设位置、靶板材料及结构因素等。

### 2.1 地质条件对爆炸毁伤能力的影响

根据已有研究结论,覆土的地质条件(砂土类型、含水量、密度、饱和度等)对浅埋炸药爆炸波能量的传递效率具有极大影响。同时,相关砂爆试验及数值仿真表明,密实砂料的体积模量及砂粒间接触力对砂爆载荷冲量传递也有不同程度的影响,但该影响略小于含水量和砂粒形貌[25,48]。

砂爆试验结果显示,砂料含水量是影响砂爆冲量传递的最主要因素:砂粒间含水量(即砂料间液相质量所占总质量之比)的增大,不仅降低了砂料孔隙率,同时也使得砂粒间接触力发生变化,包括砂粒间黏聚力[49]和体积模量[20]等,进而影响砂粒喷射的形态。对于过饱和状态的砂粒[50],炸药爆轰推动下的砂粒呈现"果汁"形态,如图 6(a)所示;对于欠饱和状态的砂粒[50],喷射的砂粒呈现离散的颗粒形态,如图 6(b)所示。砂爆试验结果显示,在炸药和

靶板布设不变的情况下,相较于干砂,湿砂浅埋炸药所产生的爆轰载荷对靶板的破坏更严重[35],靶板结构的最大变形量约增大 20% ~40% 。Hlady 通过爆炸试验验证砂土含水量对爆轰载荷的放大效应[8],试验结果表明适当地增加砂料含水量可增大砂爆载荷冲量的传递效率(约 7 倍)。

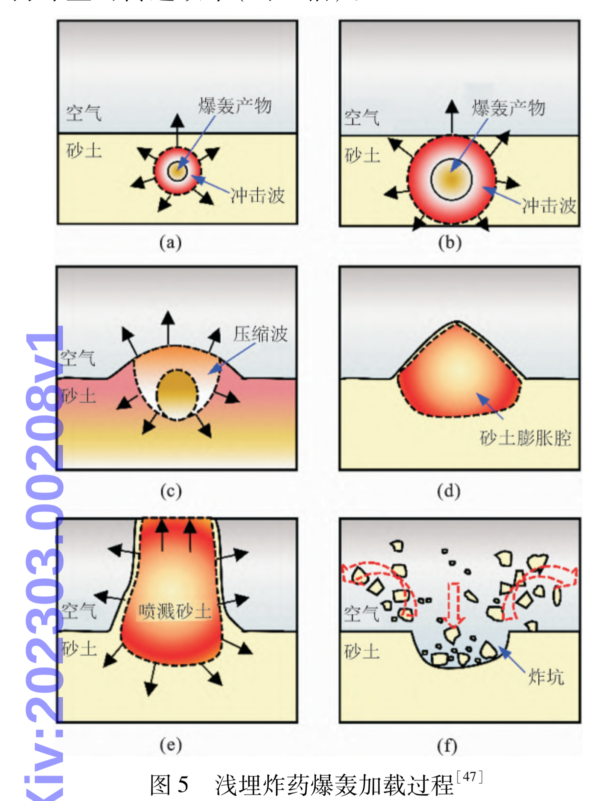
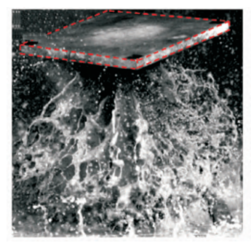



图 5 浅埋炸药爆轰加载过程[47]

Fig. 5 Loading process of blast induced by shallow-buried mines[47]

砂料中的液相物质通常被视为均匀弥散于砂粒之间。湿砂中的水分填充在砂粒间孔隙,由于液相水为黏性不可压缩物体,当爆炸冲击波挤压砂粒时,液相水在保证砂团密实的前提下实现冲击压力的传递[38],降低砂粒飞溅和摩擦所耗散的冲量。因此,对于干砂和饱和砂之间的湿砂而言,浅埋炸药爆炸所产生的砂爆冲量随含水量增加而增大[31]。此外,随着砂料间水分的增加,砂粒间的相互作用,包括砂团体积模量和抗剪强度,都将明显提升。除砂料体积模量外,液相水的存在增加了砂料的表观密度和弹性刚度。当爆轰喷射物飞溅时,与靶板撞击后的湿砂呈絮状物向四周扩散。与干砂相比,湿砂碰撞所产生的初始压力略低,但由于撞击过程中湿砂的松散膨胀延长了喷射产物对靶板的加载时间,故其加载冲量大于干砂引起的砂爆载荷冲量[31]。至今,湿砂团的体积模量和抗剪强度对砂爆载荷冲量的影响,国内外学者给出了不同的解释。Fox 等[20]认为,由含水量增加引起的砂料抗剪强度和湿砂密度的增加对砂爆载荷的影响较小。Grujicic 等[40,46]则认为湿砂中的液相水除改变砂料的抗剪强度外,还填充了砂粒孔隙:高应变率变形下,湿砂水分无法排出,导致砂料抗剪强度显著增加,从而避免了砂料在飞溅过程中的松散,进而增大了爆轰载荷冲量。此外,随着液相水进一步增加,砂料从饱和砂过渡为过饱和砂,砂料的抗剪性能明显弱化。




(a)过饱和砂 (b) 欠饱和砂

图 6 不同含水量砂土在爆轰加载下的喷射状态[50]

Fig. 6 Eject shapes of sands with different moistures under blast loading[50]

砂粒自身的几何特性(砂土种类、级配、粒径等)也影响砂爆载荷的生成和传递。不同砂料种类之间的差异主要体现在砂粒的几何特征上,包括形状、粒径等。在宏观层面,Clarke 等[24]通过采用 5 种不同砂土材料进行等药量砂爆试验,测定了砂料材料参数对爆轰载荷冲量传递的影响,结果显示:相较于其他材料参数,砂土的密度和含水量是决定砂爆载荷冲量大小的最主要因素,该结论与相关砂爆试验结果吻合[51]。在细观层面,不同粒径砂料的砂料在高应变率(约 600 $s^{-1}$)下的 Hopkinson 压杆冲压试验结果表明[48]:高压冲击波挤压下,粒径越大的砂料越易碎裂;砂料含水量越大,砂粒在空隙水压力的作用下越不易破碎。同时,不同粒径砂料的冲压试验表明,级配良好的细密砂料具有相对较好的能量吸收能力[48]。但是,细密砂粒吸收外界动能的转化形式目前尚未明确。值得关注的是,由于天然砂料的形状存在显著的随机性,借助试验研究单一形状砂料的动力学性能存在较高的技术壁垒。通过数值仿真手段,将球形单元拼装成棒状、块状和粒状砂料,Goel 等[51]分析了砂粒形状在爆轰载荷传递过程中发挥的作用,从砂粒间摩擦等角度解释了砂粒形状对爆轰载荷传递过程中冲量损耗的影响。

## 2.2 炸药及靶板布设对砂爆载荷的影响

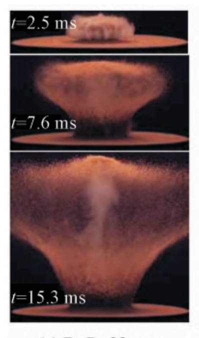
借助高速摄影和数值仿真技术,已有试验数据

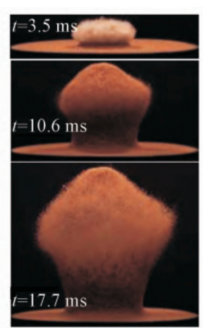
和仿真结果表明,炸药埋设深度(DoB)和炸高距离(SoD)是影响爆轰载荷和结构响应的重要因素:一定范围内,炸药浅埋深度和炸高距离的改变,将引起喷射砂粒(无论湿砂还是干砂)、爆轰产物加载区域和载荷大小的改变。

埋设深度直接决定高压爆炸空腔在膨胀扩张过程中上覆砂料的质量,是决定砂爆载荷加载过程和冲量传递的主要因素。砂爆对防护结构的加载过程可视为砂粒群对靶板的高速撞击,是将炸药化学能通过砂粒动能传递至靶板的物理过程。爆轰产物组成的高压腔体是不断变化的应力场,而靶板的炸高距离直接决定了砂爆载荷在受力面的分布状态。因此,深刻认识并量化炸药与靶板布设位置对爆轰载荷的影响,是浅埋地雷防护结构设计的首要研究目标。

图 7 给出了高压气体冲击而成的砂爆空腔的扩张过程[28]:随着埋设深度 DoB 的增加,砂爆空腔所占空间逐渐减小,即从倒锥型空腔向塔型空腔过渡;与此同时,砂爆空腔的尺寸显著缩小,膨胀速率显著降低。DoB = 32 mm 时,砂爆空腔的膨胀扩张在 $t$ = 15.3 ms 时已接近完成;相对地,就 DoB = 64 mm 砂爆而言,砂爆的喷射产物在 $t$ = 20.7 ms 时依旧处于扩张早期,而砂爆空腔在 $t$ = 34.5 ms 时才发育完成,其扩张过程相较前者延迟约 2 倍。图 8 给出根据高速摄影图片提取的砂爆空腔最高点的时程变化曲线[28],显示砂料的爆轰喷射速度随埋设深度增加而降低。但是,有 2 点值得注意。一方面,在 DoB = 32 mm 和 DoB = 48 mm 2 种砂爆过程中,其砂爆空腔演化过程的差异主要体现在砂料的横向空间分布上,空腔的纵向膨胀速率差异较小。虽然有学者通过改进砂爆冲量测量装置来观测砂爆空腔内的应力分布和变化过程[27,34],但造成该差异的原因尚未见相关报道。







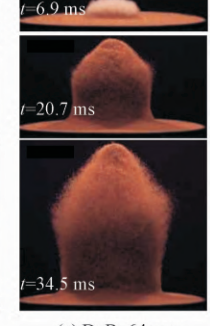



图 7 浅埋炸药爆轰空腔膨胀扩张过程[28]

Fig. 7 Expansion process of detonation cavity produced by shallow-buried explosive [28]

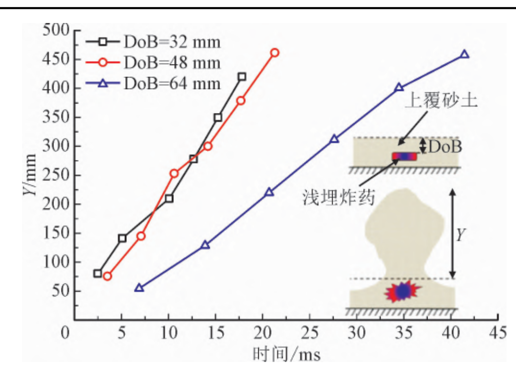


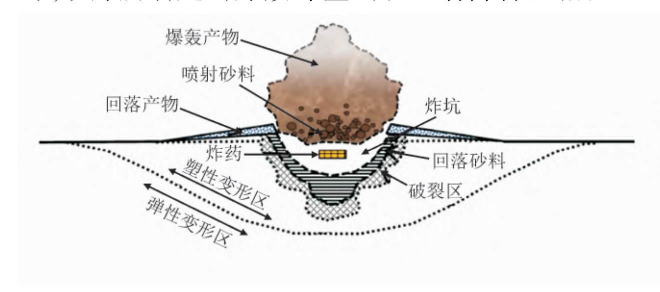

图 8 不同埋设深度炸药爆轰产物的抛掷高度[28]

Fig. 8 Ejecting height of explosive production from explosives with different buried depths [28]

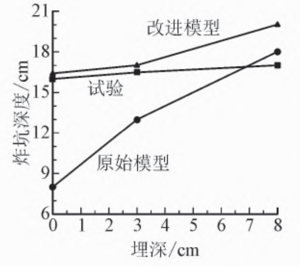
另一方面,由于成坑过程极为短暂,浅埋炸药爆炸所产生炸坑容易受爆轰产物遮挡及回落砂土的覆盖。因此,针对炸坑形成过程的分析,通常需借助数值仿真技术实现。在浅埋炸药爆轰产物的喷射和空腔膨胀扩张过程中,炸坑的最终形貌受浅埋深度、上覆砂层材料属性等因素的影响。图 9 为砂爆过程中炸坑的成坑过程示意图[43],表明炸坑形貌的决定因素为炸药的浅埋深度[6-7]:浅埋深度越深,炸坑的深度和宽度越大。该现象虽然与诸多数值模拟结论一致,但是由于数值仿真算法存在局限性,仿真计算很难反映喷射砂粒回落后引起的炸坑回填现象。同时,就现阶段而言,除 SPH/DEM 等算法外,针对浅埋炸药的砂粒喷射飞溅及炸坑形成过程的模拟均未考虑离散砂粒的碰撞、反射和回落。此外,砂粒间的黏结作用和体积模量等力学性能也是影响炸坑形貌的关键因素[29,52-53]。因此,可将砂爆炸坑的形成过程和形貌特征作为验证砂料材料参数及其模拟算法准确性的参照依据。与此同时,由于爆轰过程中砂粒的高速飞溅,很难通过现有试验设备捕捉计算喷射砂料的质量,故可通过炸坑的形貌和尺寸近似获取喷射砂料的质量。

相较于爆轰产物和炸坑形貌,国内外装甲车辆防护研究的学者和工程师更为关注的是炸药埋设深度对爆轰载荷的影响。图 10 为砂爆试验中[10-11]不同埋设深度(DoB)、埋设高度(HoB)和靶板炸高距离(SoD)等不同工况下的爆轰载荷。总体而言,随着炸药的埋设高度(炸药底部与砂料底部之间的垂直距离)和靶板炸高距离的增加,浅埋炸药产生的砂爆冲量降低[10-11,28,31,37,54-55]。值得注意的是,图 10 (a)给出了 14 g PE 炸药在不同埋设深度下的冲量变化曲线:由此可见,即使靶板的炸高距离不同,砂爆载荷的冲量测量值依旧满足随 DoB 先增加而后

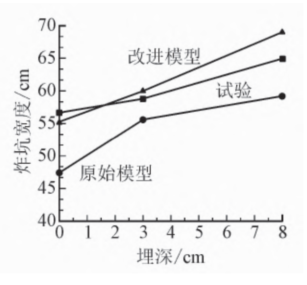
降低的趋势。Pickering 等[11]的砂爆试验测量结果，同样表明，砂爆载荷冲量与炸药埋设深度的关系并非满足简单的正相关关系：在一定范围内，浅埋炸药埋设深度越深，炸药爆轰所产生的冲量越大；但是，埋设深度超过某一深度时，随着埋设深度的进一步加深，砂爆所引起的爆轰冲量出现显著降低。相应地，Vivek 等[28]利用高压气体驱动上覆砂土掀抛，通过高速摄影记录了不同砂土材料的掀抛过程，分析了浅埋深度(DoB)和炸高距离(SoB)对爆轰产物掀抛过程的影响。试验结果显示：对于不同浅埋深度和炸高距离工况下的爆轰冲量，当 SoB/DoB = 2.5 时，爆轰载荷所产生的冲量最大。




(a) 炸坑形貌示意图[43]



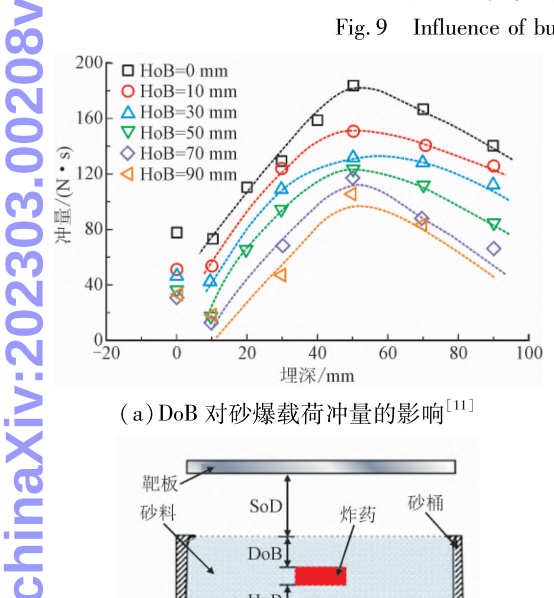

(b) DoB 对炸坑深度的影响[6]

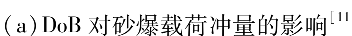


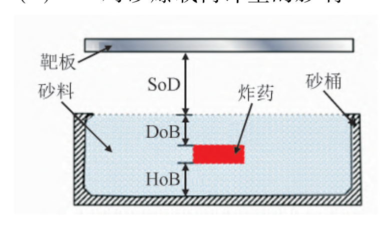

(c) DoB 对炸坑宽度的影响[6]

图 9 炸药埋设深度对砂爆炸坑形貌的影响

Fig. 9 Influence of buried depth of explosive on crater shapes





(a) DoB 对砂爆载荷冲量的影响[11]




(b) 炸药埋设示意图

图 10 炸药布设位置对砂爆载荷的影响

Fig. 10 Influence of explosive location on blast loading

## 2.3 爆轰冲量预测模型

在浅埋炸药爆轰载荷的毁伤研究和防护设计过程中，准确预测浅埋炸药的载荷冲量是评定爆炸毁伤效果和装甲防护性能的前提。目前，砂爆载荷的参数化表征和预测通常采用基于试验数据的经验计算公式。

Westine 等[56]基于试验数据给出的浅埋炸药爆轰载荷冲量计算模型，是目前应用最为广泛的浅埋炸药爆轰载荷的计算手段。在该模型中，靶板迎爆面上的冲量分布主要取决于以下三方面：炸药参数、砂料密度及布设位置。同时，该模型给出了靶板上任意点的冲量数值表达式为

$$i_v(x,y)=0.1352\left(1+\frac{7}{9}\frac{\delta}{z}\right)\left[\frac{\tanh(0.9589\xi d)}{\xi d}\right]^{3.25}\sqrt{\frac{\rho E}{z}} \tag{11}$$

$$\xi=\frac{\delta}{z^{5/4}A^{3/8}\tanh\left[\left(2.2\frac{\delta}{z}\right)^{3/2}\right]} \tag{12}$$

其中：$i$ 为靶板某位置处的冲量；$\xi$ 为与爆炸工况相关的载荷常数；该常数与浅埋炸药截面面积 $A$、埋深 $\delta$ 和间距 $z$ 有关；$d$ 为该位置与炸药中心的横向距离；$\rho$ 为上覆砂料密度；$E$ 为炸药的比能量。

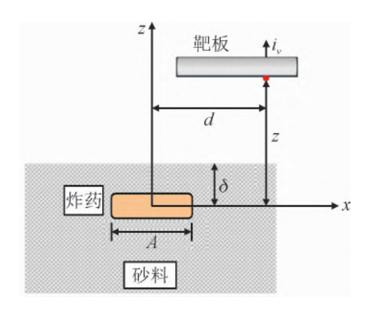



图 11 浅埋炸药爆炸载荷冲量模型[56]

Fig. 11 Prediction model of impulsive momentum from blast loading of shallow-buried mine [56]

在此基础上，Clarke 等[24]通过拟合砂爆试验的测量结果，给出了含水量和密度对 Westine 公式的修正系数经验公式为

$$I=0.89935-0.098907w+0.033118\rho+0.077821w\rho_s \tag{15}$$

其中：$I$ 为冲量修正系数；$w$ 为含水量；$\rho_s$ 为砂粒密度。

## 3 总结与展望

浅埋炸药爆轰载荷及其防护是军事防护领域的重要研究内容,研究并揭示该类载荷的作用机理及其影响因素是提升武装车辆防雷抗爆性能的前提与基础。本文综述了浅埋炸药爆轰载荷问题的国内外研究进展,分别从加载机理及其影响因素等方面展开介绍,并就现阶段的热点、难点问题进行评述。基于已有研究成果,在浅埋炸药爆轰加载机理和研究方法等方面,笔者认为在今后的研究过程中还需对如下问题重点关注。

1）浅埋炸药爆炸载荷的研究方式目前的研究中多以实验和仿真分析为主,缺少理论研究。

2）对于浅埋炸药的爆炸加载过程,包括气液固三相混合砂料及爆轰产物的相互作用过程还需进行更为细致的仿真和预测;另外,半封闭或封闭空间内的浅埋炸药爆炸载荷与靶板的相互作用问题同样值得深入研究。

3）对于传统防护结构在浅埋炸药爆炸载荷下的力学响应,包括爆轰产物与靶板的冲量传递机理、防护靶板的能量吸收机理等问题需进一步探讨。



## 参考文献


[1] KANIA E. Development tendency of landmine protection in vehicle [J]. Modelling and optimization of physical systems,2009,8: 67-72.

[2] CALLAWAY D W,BURSTEIN J L. Operational and medical management of explosive and blast incidents [M]. Cham: Springer International Publishing,2020.

[3] 张钱城,郝方楠,李裕春,等. 爆炸冲击载荷作用下车辆和人员的损伤与防护[J]. 力学与实践,2014,36(5):527-539. (ZHANG Qiancheng, HAO Fangnan, LI Yuchun, et al. Research progress in the injury and protection to vehicle and passengers under explosive shock loading [J]. Mechanics in engineering, 2014,36(5):527-539(in Chinese)).

[4] 石秉良,王显会,张云,等. 军用车辆底部防护研究与发展综述[J]. 兵工学报,2016,37(10):1902-1914. (SHI Bingliang, WANG Xianhui,ZHANG Yun,et al. An overview of developmentand research on bottom protection capability of military vehicle [J]. Acta armamentarii,2016,37(10):1902-1914(in Chinese)).

[5] RAMASAMY A,HILL A M,MASOUROS S D,et al. Evaluating the effect of vehicle modification in reducing injuries from landmine blasts. An analysis of 2212 incidents and its application for humanitarian purposes[J]. Accident analysis & prevention,2011,43(5): 1878-1886.

[6] GRUJICIC M,PANDURANGAN B,CHEESEMAN B A. The effect of degree of saturation of sand on detonation phenomena associated with shallow-buried and ground-laid mines[J]. Shock and vibration,2006,13(1):41-61.

[7] GRUJICIC M,PANDURANGAN B,CHEESEMAN B A. A computational analysis of detonation of buried mines[J]. Multidiscipline modeling in materials and structures,2006,2(4):363-387.

[8] HLADY S L. Effect of soil parameters on land mine blast[C]// Proceedings of the 18th Military Aspects of Blast and Shock (MABS) Conference in Bad Reichenhall. Germany: [s. n.], 2004.

[9] ANDERSON C E, BEHNER T, WEISS C E. Mine blast loading experiments[J]. International journal of impact engineering,2011, 38(8/9):697-706.

[10] FOX D M,HUANG X,JUNG D,et al. The response of small scale rigid targets to shallow buried explosive detonations[J]. International journal of impact engineering,2011,38(11):882-891.

[11] PICKERING E G, CHUNG KIM YUEN S, NURICK G N. The influence of the height of burial of buried charges-Some experimental observations[J]. International journal of impact engineering, 2013,58:76-83.

[12] PINGLE S M, FLECK N A, WADLEY H N G, et al. Discrete element calculations of the impact of a sand column against rigid structures[J]. International journal of impact engineering, 2012, 45:74-89.

[13] PARK S, UTH T, FLECK N A, et al. Sand column impact onto a Kolsky pressure bar[J]. International journal of impact engineering,2013,62:229-242.

[14] LIU T,WADLEY H N G,DESHPANDE V S. Dynamic compression of foam supported plates impacted by high velocity soil[J]. International journal of impact engineering,2014,63:88-105.

[15] UTH T,DESHPANDE V S. Response of clamped sandwich beams subjected to high-velocity impact by sand slugs[J]. International journal of impact engineering,2014,69:165-181.

[16] STEVENS D J, Barsotti M A. Modeling of landmine loading of armored vehicles and extension to field testing assessment[C]// Proceedings of 2016 NDIA Ground Vehicle Systerm Engineering and Technology Symposium,Michigan:[s. n. ],2016.

[17] BARSOTTI M,SAMMARCO E,STEVENS D. Comparison of strategies for landmine modelling in LS-DYNA with sandy soil material model development [C] // Proceedings of 14th International LS-DYNA User Conference. Cambridge,MA: MIT Press,2016.

[18] CHEN J Y,PENG C,LIEN F S. Simulations for three-dimensional landmine detonation using the SPH method[J]. International journal of impact engineering,2019,126:40-49.

[19] OLOVSSON L, HANSSEN A G, RVIK T, et al. A particle-based approach to close-range blast loading[J]. European journal of mechanics-A/solids,2010,29(1):1-6.

[20] 钱七虎. 岩石爆炸动力学的若干进展 [J]. 岩石力学与工程学

报,2009,28(10):1945-1968.(QIAN Qihu. Some advances in rock blasting dynamics[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2009,28(10):1945-1968(in Chinese)).

[21] BANGASH M Y H. Shock,Impact and explosion:structural analysis and design[M]. Heidelberg:Springer,2009.

[22] NATO: Procedures for evaluating the protection level of logistic and light armoured vehicles-Mine Treat-AEP-55[S]. [S. l.]: Allied Engineering Publication,2006.

[23] ERDIK A,KILIC S A, KILIC N, et al. Numerical simulation of armored vehicles subjected to undercarriage landmine blasts[J]. Shock waves,2016,26(4):449-464.

[24] CLARKE S D,FAY S D,WARREN J A,et al. Predicting the role of geotechnical parameters on the output from shallow buried explosives[J]. International journal of impact engineering,2017,102:117-128.

[25] RIGBY S E,FAY S D,CLARKE S D,et al. Measuring spatial pressure distribution from explosives buried in dry Leighton Buzzard sand[J]. International journal of impact engineering,2016,96:89-104.

[26] RIGBY S E,FAY S D,TYAS A,et al. Influence of particle size distribution on the blast pressure profile from explosives buried in saturated soils[J]. Shock waves,2018,28(3):613-626.

[27] KYNER A,DESHPANDE V S,WADLEY H N G. Impulse transfer during granular matter impact with inclined sliding surfaces[J]. International journal of impact engineering,2019,130:79-96.

[28] VIVEK P,SITHARAM T G. Sand ejecta kinematics and impulse transfer associated with the buried blast loading:a controlled laboratory investigation[J]. International journal of impact engineering,2017,104:85-94.

[29] RESNYANSKY A D,WECKERT S A. Experiments and constitutive modelling of sand ejecta impact[J]. Journal of dynamic behavior of materials,2018,4(4):586-607.

[30] GRUJICIC M,GLOMSKI P,CHEESEMAN B. Dimensional analysis of impulse loading resulting from detonation of shallow-buried charges[J]. Multidiscipline modeling in materials and structures,2013,9(3):367-390.

[31] MCSHANE G J,DESHPANDE V S,FLECK N A. A laboratory-scale buried charge simulator[J]. International journal of impact engineering,2013,62:210-218.

[32] 徐小辉,邱艳宇,王明洋,等.大当量浅埋地下爆炸抛掷成坑效应的缩比模拟实验装置[J].爆炸与冲击,2018,38(6):1333-1343.(XU Xiaohui,QIU Yanyu,WANG Mingyang,et al. Development of the testing apparatus for modeling large equivalent underground cratering explosions[J]. Explosion and shock waves,2018,38(6):1333-1343(in Chinese)).

[33] CLARKE S D,FAY S D,WARREN J A,et al. A large scale experimental approach to the measurement of spatially and temporally localised loading from the detonation of shallow-buried explosives [J]. Measurement science and technology,2015,26(1):015001.

[34] DENEFELD V,HEIDER N,HOLZWARTH A. Measurement of the spatial specific impulse distribution due to buried high explosive charge detonation[J]. Defence technology,2017,13(3):219-227.

[35] DHARMASENA K P,WADLEY H N G,LIU T,et al. The dynamic response of edge clamped plates loaded by spherically expanding sand shells[J]. International journal of impact engineering,2013,62:182-195.

[36] KYNER A,DHARMASENA K,WILLIAMS K,et al. Response of square honeycomb core sandwich panels to granular matter impact [J]. International journal of impact engineering,2018,117:13-31.

[37] BORVIK T,OLOVSSON L,HANSSEN A G,et al. A discrete particle approach to simulate the combined effect of blast and sand impact loading of steel plates[J]. Journal of the mechanics and physics of solids,2011,59(5):940-958.

[38] WANG Z Q,HAO H,LU Y. A three-phase soil model for simulating stress wave propagation due to blast loading[J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics,2004,28(1):33-56.

[39] 崔云霄,胡永乐,陈剑杰,等.容器内填沙爆炸实验的数值模拟[J].兵工学报,2010,31(增刊1):1-5.(CUI Yunxiao,HU Yongle,CHEN Jianjie,et al. Numerical simulation for explosive test in explosion containment vessel filled with sand[J]. Acta armamentarii,2010,31(S1):1-5(in Chinese)).

[40] GRUJICIC M,PANDURANGAN B,MOCKO G M,et al. A combined multi-material Euler/Lagrange computational analysis of blast loading resulting from detonation of buried landmines[J]. Multidiscipline modeling in materials and structures,2008,4(2):105-124.

[41] DE A. Numerical simulation of surface explosions over dry,cohesionless soil[J]. Computers and geotechnics,2012,43:72-79.

[42] 王维国,刘汉龙,陈育民,等.砂土地基触地爆炸的SPH-FEM耦合分析方法[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2013,14(3):271-276.(WANG Weiguo,LIU Hanlong,CHEN Yumin,et al. Coupled SPH-FEM method for analyzing touchdown explosion in sand foundation [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (natural science edition),2013,14(3):271-276(in Chinese)).

[43] SALEH M,EDWARDS L. Evaluation of soil and fluid structure interaction in blast modelling of the flying plate test[J]. Computers & structures,2015,151:96-114.

[44] 张鑫磊,周云波,王显会,等.浅埋炸药爆炸对靶板冲击的仿真方法对比研究[J].爆破,2016,33(4):46-50.(ZHANG Xinlei,ZHOU Yunbo,WANG Xianhui,et al. Comparative analysis of simulation method of the target subjected to burial mine blast loading [J]. Blasting,2016,33(4):46-50(in Chinese)).

[45] 李晓坤,郭香华,张庆明.浅埋地雷爆炸载荷分布的数值仿真分析[J].兵器装备工程学报,2020,41(1):188-192.(LI Xiaokun,GUO Xianghua,ZHANG Qingming. Numerical simulation analysis on the distribution of explosive loads in shallow buried mines[J]. Journal of ordnance equipment engineering,2020,41(1):188-192(in Chinese)).

[46] GRUJICIC M,PANDURANGAN B,HARIHARAN A. Comparative discrete-particle versus continuum-based computational investigation of soil response to impulse loading[J]. Journal of materials

engineering and performance,2011,20(9):1520-1535.

[47] GRUJICIC M,YAVARI R,SNIPES J,et al. A combined finite-element/discrete-particle analysis of a side-vent-channel-based concept for improved blast-survivability of light tactical vehicles[J]. International journal of structural integrity,2016,7(1):106-141.

[48] LUO H Y,COOPER W L,LU H B. Effects of particle size and moisture on the compressive behavior of dense Eglin sand under confinement at high strain rates[J]. International journal of impact engineering,2014,65:40-55.

[49] FLORES-JOHNSON E A, WANG S, MAGGI F, et al. Discrete element simulation of dynamic behaviour of partially saturated sand [J]. International journal of mechanics and materials in design, 2016,12(4):495-507.

[50] GENSON K W. Vehicle shaping for mine blast damage reduction [D]. [S. l. ]:University of Maryland,2006.

[51] GOEL A,UTH T,LIU T,et al. Coupled discrete/continuum simulations of the impact of granular slugs with clamped beams:Stand-off effects[J]. Mechanics of materials,2018,116:90-103.

[52] LINFORTH S,TRAN P,RUPASINGHE M,et al. Unsaturated soil blast:Flying plate experiment and numerical investigations[J]. International journal of impact engineering,2019,125:212-228.

[53] GRUJICIC M,PANDURANGAN B,SUMMERS J D,et al. Application of the modified compaction material model to the analysis of landmine detonation in soil with various degrees of water saturation [J]. Shock and vibration,2008,15(1):79-99.

[54] RIMOLI J J,TALAMINI B,WETZEL J J,et al. Wet-sand impulse loading of metallic plates and corrugated core sandwich panels[J]. International journal of impact engineering,2011,38(10):837-848.

[55] HOLLOMAN R L,DESHPANDE V,WADLEY H N G. Impulse transfer during sand impact with a cellular structure[J]. International journal of impact engineering,2015,82:36-58.

[56] WESTINE P,MORRIS B,COX P,et al. Development of computer program for floor plate response from land mine explosions[R]. [S. l. ]:US Army Tank-Automotive Command,1985.

（编辑　李坤璐）